

Направления совершенствования методов испытаний гибридных лидарных систем дистанционного мониторинга загрязнений окружающей среды физиологически активными веществами

**Ю.А. Палатов¹, А.М. Антохин², С.А. Втюрин¹, Н.А. Князев¹, А.И. Коробкин²,
В.Н. Фатеенков²**

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Институт дистанционных исследований окружающей среды*

117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

E-mail: yupalatov@yandex.ru, nknyazev@iki.rssi.ru

В работе рассматриваются особенности проведения «специальных» испытаний гибридных лидарных систем дистанционной индикации физиологически активных веществ (ФАВ), к которым относятся испытания по определению обнаружительных характеристик изделий, таких как чувствительность, дальность и вероятность обнаружения облаков ФАВ. Сформулированы основные направления по совершенствованию методов проведения специальных испытаний и развитию полевых испытательных комплексов.

Введение

Гибридные лидарные системы по мере их развития становятся неотъемлемой составной частью бортовой аппаратуры аэрокосмического мониторинга загрязнений окружающей среды физиологически активными веществами (ФАВ), поскольку позволяют успешно решить проблему глобального и регионального контроля состояния окружающей среды (ОС) в современной сложной техногенной обстановке и активизации международного терроризма [1-8]. Здесь уместно отметить, что под ФАВ принято понимать токсичные вещества широкого класса, включающими в свой состав сильно ядовитые вещества (СДЯВ), суперэкоотоксиканты (СЭТ), отравляющие вещества (ОВ), средства уничтожения растительности, аэрозоли биологической природы (БС), радиоактивные вещества (РВ) и т.п., обладающие сильным токсическим воздействием на человека и окружающую среду. К ФАВ относятся широко известные промышленные газы и вещества, такие как аммиак, озон, хлор, окислы азота, окислы серы и т.п.

Нами ранее было показано, что дистанционный мониторинг всего многообразия ФАВ может быть осуществлен только на основе использования гибридных лидарных систем, разработка которых стала особенно актуальной в последние годы в связи все возрастающей угрозой терроризма и непрерывно растущим химическим, радиоактивным и биологическим загрязнением окружающей среды [6-9].

Под гибридными понимают лидары, основанные на комплексном применении методов активной и пассивной лазерной локации и использующими одновременно несколько эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом [6]. В качестве примеров можно привести лидары на использовании аэрозольного рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции, лидары на основе методов комбинационного рассеяния света и лазерно-индуцированной люминесценции, дифференциального поглощения и рассеяния на колебательно-вращательных переходах молекул и регистрации ИК-теплового излучения на этих же переходах. Наиболее ярким примером гибридного лидара является многоволновой лидарный комплекс МЛК [10].

Гибридные лидары являются одним из перспективных направлений разработки аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющими успешно решить проблему

мониторинга из космоса газо-аэрозольных загрязнений окружающей среды, в том числе и ФАВ. Нами ранее показано, что только комплексное использование методов оптической локации может обеспечить высокочувствительное и специфичное обнаружение и контроль ФАВ в любых агрегатных состояниях (пар, аэрозоль, жидкость) и в приземном слое атмосферы и на подстилающей поверхности [1-6].

Несмотря на многочисленные разработки, до настоящего времени отсутствуют единые методологические основы проведения оценки основных параметров лидарных систем и соответствующая испытательная база. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость и актуальность настоящих исследований по разработке современной испытательной базы и совершенствованию методов испытаний. Главная цель наших исследований создание единых универсальных методов определения наиболее важных параметров лидаров, а именно, обнаружительных характеристик лидаров с помощью современной испытательной базы.

1. Специальные испытания по определению обнаружительных характеристик лидарных систем

Основной целью специальных испытаний (испытаний по определению обнаружительных характеристик) является оценка соответствия полученных тактико-технических характеристик (ТТХ) созданного в ходе разработки лидара (образца) требованиям, заданным в ТТЗ на его разработку, а также определение путей дальнейшей его доработки с целью обеспечения требований ТТЗ. Из всего многообразия видов испытаний в настоящей работе рассматриваются только испытания, касающиеся оценки наиболее важных характеристик лидаров, а именно обнаружительных характеристик.

Лидарные системы должны пройти этот вид испытаний на всех этапах выполнения НИОКР по созданию образца:

- на этапе НИР проводится оценка обнаружительных параметров экспериментального макета разрабатываемого изделия с целью определения целесообразности постановки ОКР,

- на стадии ОКР:

- на этапах эскизного проектирования и технического проекта проводятся испытания макета изделия для обоснования технических решений; используемых при разработке рабочей конструкторской документации;

- на этапе предварительных (заводских) испытаний проводится оценка достигнутых параметров изделия в опытном образце изделия и по результатам испытаний принимается решение по доработке с целью получения заданных в ТТЗ обнаружительных характеристик изделия и изготовлении образца, предъявляемого на государственные (приемочные) испытания.

- на этапе государственных испытаний в ходе специальных испытаний проводится окончательная оценка соответствия обнаружительных характеристик лидара требованиям ТТЗ и принимается решение о серийном производстве и доработке.

К обнаружительным характеристикам лидарных систем относятся:- чувствительность обнаружения ФАВ, -дальность обнаружения облаков ФАВ, -вероятность обнаружения облаков ФАВ, и ложной тревоги, -вероятность пропуска цели (участков загрязненной атмосферы и подстилающей поверхности), -специфичность обнаружения ФАВ на фоне естественных атмосферных и антропогенных примесей, т.е. характеристики, которые определяют технический облик лидарной системы как изделия.

В таблице 1 для иллюстрации приведены перечисленные характеристики и диапазон их величин, определяемые при проведении данных видов испытаний. Из данных следует, что проведение указанных видов испытаний сопряжено с измерениями обнаружительных характеристик лидаров в очень широком диапазоне их значений, так диапазон обнаруживаемых

концентраций ФАВ может составить от 10^{-7} г/м³ до 10^2 г/м³, а диапазон дальностей обнаружения облаков от 50 м до 500 км.

Таблица 1. Диапазон значений обнаружительных характеристик (параметров) лидарных систем дистанционной индикации ФАВ

<i>Параметр, определяемый в испытаниях</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Диапазон значений</i>	<i>Примечание</i>
1	2	3	4
1. Дальность обнаружения	м	от 50 м до 500 км	Зависит от ТТХ лидара и микро и макроструктуры облака ФАВ
2. Мертвая зона	м	от 10 м до 1 км	
3. Чувствительность обнаружения	г/м ³		Определяется ТТХ лидара и сечением рассеяния облака ФАВ
3.1. Безопасных уровней (концентраций) ФАВ		от 10^{-5} до 10^{-2}	Зависит от типа ФАВ его токсичности и агрегатного состояния (пар, аэрозоль)
3.2. Предельно допустимых концентраций (ПДК) ФАВ		от 10^{-7} до 10^{-4}	
3.3. Летальных (весьма опасных концентраций) ФАВ		от 10^{-2} до 10^2	
4. Вероятность обнаружения облака ФАВ (участка загрязнения)	отн. ед	от 0,9 до 0,99	Связана с дальностью обнаружения, концентрацией ФАВ, размерами облака и уровнем фоновых помех
4.1 Вероятность ложной тревоги	отн. ед	от 0,1 до 0,01	
4.2. Вероятность пропуска цели (необнаружения)	отн. ед	от 0,1 до 0,01	
5. Разрешение по дальности	м	от 5 до 500	Зависит от параметров приемопередающего тракта
6. Специфичность обнаружения ФАВ		Обнаружение ФАВ на фоне концентраций атмосферных примесей превосходящих концентрации ФАВ 3-4 порядка	Зависит от ширины спектральных линий и примесей

В таблице 2 приведены возможные типы лидаров, пригодные для дистанционной индикации ФАВ. Особенности и преимущества каждого из перечисленных типов лидаров для дистанционной индикации ФАВ достаточно подробно рассмотрены в работах [1- 6].

Таблица 2. Основные типы лидарных систем, предназначенных для дистанционной индикации ФАВ

Тип лидара	Диапазон длин волн, мкм	Тип взаимодействия излучения с веществом	Агрегатное состояние ФАВ
1	2	3	4
Лидары на методах активной локации			
1. Аэрозольный лидар	0,25-1,5	Миевское (аэрозольное) рассеяние	аэрозоли ФАВ
2. Раман-лидар (КРС)	0,25-1,5	Комбинационное рассеяние света	пары и аэрозоли ФАВ
3. Лидар дифференциального поглощения и рассеяния с естественным отражателем (ДП)	2,5-15	Поглощение на колебательно-вращательных переходах молекул ФАВ	только пары ФАВ
4. Люминесцентный лидар	0,25-1,5	Лазерно-индуцированная люминесценция (флуоресценция)	пары и аэрозоли ФАВ
5. Лидар дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР)	2,5-15	Дифференциальное поглощение и рассеяние на колебательно-вращательных переходах	пары и аэрозоли ФАВ
6. Релеевский лидар	0,25-1,5	Релеевское рассеяние	пары ФАВ
7. Доплеровский лидар	0,5-15 мкм	Эффект доплера	
Лидары на пассивных методах локации			
1. Корреляционный спектрометр-радиометр	2,5-15 мкм	Тепловое ИК- излучение на вращательно-колебательных переходах молекул ФАВ	Пары ФАВ
2. Ик-спектрометр–радиометр	2,5-15 мкм		
3. Фурье спектрометр–радиометр	2,5-15 мкм		

Из приведенного следует, что специальным испытаниям принадлежит особая роль в создании промышленного образца лидарной системы и важность создания современной метрологически аттестованной базы для проведения этих испытаний. Сказанное подтверждается проведением серии испытаний принятого на снабжение комплекса МЛК, общий вид которого и конструкция приведены для иллюстрации на рис. 1-2 [10].



Рис. 1. Лидарные комплексы, испытанные на ПАИК

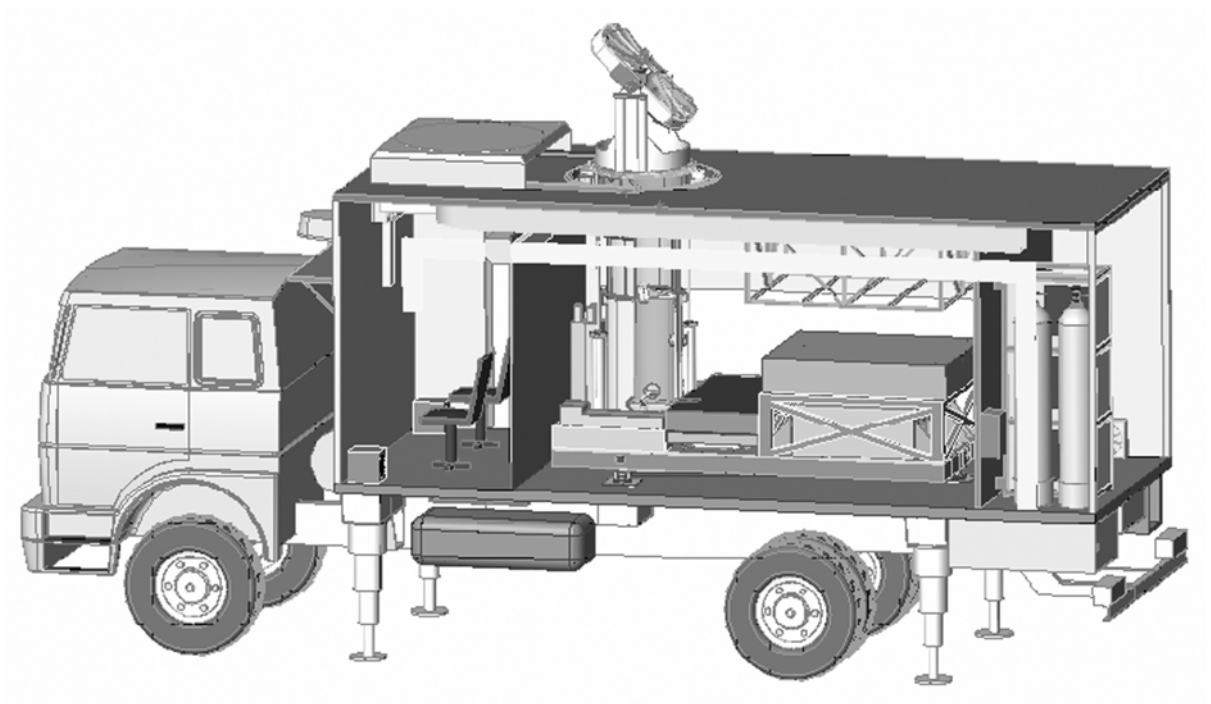


Рис. 2. Компоновка лидарной гибридной системы типа МЛК

2. Комплексная автоматизированная система проведения специальных испытаний

В предшествующих работах показано, что для обеспечения испытаний образцов лидарных систем необходимо создание комплексной автоматизированной системы поведения специальных испытаний (КАСПИ). Созданная система КАСПИ включает в свой состав следующие испытательные комплексы и технические средства:

1. Полевой аэрозольный испытательный комплекс ПАИК;
2. Газово-аэрозольная камера ГАЭК;
3. Полевую аэродинамическую трубу АТ;

4. Модельные поля с вышками МП;
5. Технические средства полевого технического контроля,
6. Средства метрологического обеспечения;
7. Программно-вычислительный комплекс.

КАСПИ предназначена для достоверной оценки проверяемых в ходе специальных испытаний тактико-технических характеристик гибридных лидарных систем дистанционной индикации ФАВ по модельным облакам ФАВ. В КАСПИ входят средства создания и технические средства контроля параметров макро и микроструктуры модельных облаков ФАВ.

КАСПИ осуществляет моделирование оптических свойств локализованного участка возмущенной атмосферы при воздействии на нее ФАВ от типовых источников загрязнения. Осуществляется моделирование загрязнения атмосферы от различного типа источников загрязнения: мгновенный, непрерывный, точечный и объемный.

Модельные облака ФАВ создаются с заданными параметрами макроструктуры. Контролируются размеры облака (глубина, фронтальный размер), а также параметры микроструктуры (счетная концентрация частиц аэрозоля, массовая концентрация частиц, среднемассовая концентрация паров ФАВ в облаке, вид функции распределения частиц по размерам (распределение Юнга, гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение).

Создаются модельные облака ФАВ более чем 40 типов ФАВ с концентрациями от 10^{-6} до 10^{-1} г/м³, а также облака примесей (пыль, дымы, аэрозоли биологической природы, выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания и т.п.). Это обеспечивает проведение испытаний лидарных систем не только по определению порога чувствительности обнаружения, но также и проведение испытаний по определению специфичности обнаружения того или иного ФАВ.

Моделирование оптических свойств облаков паров ФАВ в заданном диапазоне спектра (от 0,25 мкм до 15 мкм) осуществляется с помощью 20-метровой газовой-аэрозольной камеры ГАЭК, здесь же моделируются мелкодисперсные облака (средний диаметр от 0,1 до 5-10 мкм). Основным критерием при моделировании облаков паров ФАВ является оптическая плотность (оптическая толщина) модельного облака, характеризующаяся интегральной массой вещества на трассе зондирования:

$$M_{CW} = \int_0^L C_l dl = CL,$$

где интегральная масса M_{CW} , C - средняя концентрация вещества, L - протяженность трассы зондирования.

Модельные облака грубодисперсного аэрозоля создаются при помощи полевого испытательного комплекса ПАИК, представленного на рис. 3. На рис. 4 представлен общий вид аппаратного зала ПАИК с генераторами монодисперсных капель.



Рис. 3. Полевой аэрозольный комплекс – ПАИК

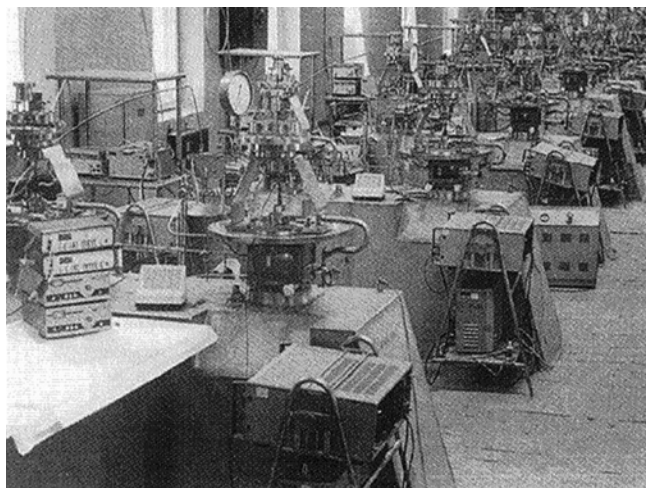


Рис. 4. Аппаратный зал с генераторами монодисперсных капель ГМК

Моделирование заданного распределения аэрозольных частиц по размерам осуществляется с помощью генераторов монодисперсных капель путем набора соответствующих потоков монодисперсных аэрозольных капель.

КАСПИ обеспечивает определение следующих характеристик лидаров:

1. Максимальную и минимальную дальности обнаружения облаков ФАВ ($R_{\min}$ и $R_{\max}$),
2. Чувствительность обнаружения ($C_{\text{без}}$, $C_{\text{пдж}}$, $C_{\text{опас}}$),
3. Вероятность правильного обнаружения облака ФАВ ($P_{\text{обн}}$),
4. Вероятность необнаружения цели ($P_{\text{необ}}$),
5. Вероятность ложной тревоги ($P_{\text{лож}}$),
6. Разрешение по дальности (ΔR),
7. Специфичность обнаружения.

Перечисленные параметры лидаров зависят от оптических свойств возмущенной атмосферы (т.е. параметров облаков ФАВ), таких как: коэффициент обратного рассеяния K_p или эффективной площади локационного сечения β_p ; сечения ослабления атмосферы (затухания) на трассе зондирования α_p , а также сечения других эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, например сечения комбинационного рассеяния света $\sigma_{\text{крс}}$ для лидара КРС, сечения люминесценции $\sigma_{\text{люм}}$ для лидара люминесцентного и т.п.

3. Направления совершенствования методов проведения специальных испытаний лидарных систем и испытательной базы

Основные направления совершенствования методов проведения специальных испытаний лидарных систем и испытательной базы можно сформулировать по результатам опытной эксплуатации системы КАСПИ в следующем виде:

1. Разработка научно-методических основ проведения специальных испытаний.
2. Совершенствование методов математического и физического моделирования.
3. Совершенствование метрологического обеспечения измерений при проведении испытаний с целью повышения достоверности результатов:
 - создание эталонных целей (мишеней), эквивалентов модельных облаков ФАВ;
 - создание эталонных смесей ФАВ.
4. Совершенствование методик и технических средств обеспечения требований техники безопасности и охраны окружающей среды при проведении натурных испытаний лидаров с ФАВ:
 - разработка нетоксичных имитационных рецептур ФАВ, моделирующих физические и оптические свойства ФАВ;

- разработка испытательных комплексов.
- 5. Автоматизация и компьютеризация процесса проведения специальных испытаний:
 - автоматизация процесса создания и контроля параметров модельных облаков ФАВ ;
 - автоматизация измерений параметров лидарного зондирования и компьютерная обработка данных зондирования.
- 6. Совершенствование программно-математического обеспечения и методов компьютерной обработки.

4. Заключение

В настоящей работе проведен анализ методов проведения специальных испытаний и разработаны рекомендации по совершенствованию этих методов проведения полевых (натурных) испытаний гибридных лидарных систем и соответствующей полевой испытательной базы.

Показано, что для достоверного определения обнаружительных характеристик лидарных систем необходимо создание модельных облаков ФАВ (их имитаторов) с метрологически аттестованными параметрами при помощи специальной полевой испытательной базы.

Описывается система КАСПИ для проведения специальных испытаний лидарных систем на разных этапах жизненного цикла их разработки. Модельные облака паров ФАВ в КАСПИ создаются с помощью газовой-аэрозольной камеры- ГАЭК, а модельные облака аэрозолей с помощью полевого аэрозольного испытательного комплекса -ПАИК, оснащенных генераторами паров и аэрозолей, а также измерительной аппаратурой контроля параметров микро и макроструктуры модельных облаков.

Созданная система КАСПИ может найти широкое применение для проведения специальных испытаний отечественных лидарных систем.

Литература

1. Лазерный контроль атмосферы. *Под ред. Э.Д. Хинкли* // М.: Мир. 1979.
2. *Межерис Р.*, Лазерное дистанционное зондирование атмосферы. // М.: Мир. 1987.
3. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. *Под ред. Рождествина В.Н.* // М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э, 2002,-552 с.
4. *Byer R.L.* Remote air pollution measurement // Opt. and Quantum Elect. 1975, vol. 7, p 147-177.
5. *Килдал, Баер.* Сравнение лазерных методов дистанционного обнаружения веществ, загрязняющих атмосферу. // ТИИЭР. 1971 г., т. 59. № 12, с 5-30.
6. *Палатов Ю.А., Князев Н.А., Втюрин С.А* Перспективы использования гибридных лидарных систем для мониторинга загрязнений окружающей среды из космоса //Третья открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». // М.:-ИКИ РАН. 16-18 ноября 2005 г.
7. *Палатов Ю.А., Князев Н.А., и др.* Мониторинг аварийных ситуаций, пожаров и промышленных выбросов при помощи космических средств наблюдений. /Российско-канадский семинар: Моделирование атмосферного переноса загрязнений при террористических актах, взрывах и пожарах промышленных предприятий //, 19-21 июня 2006, ГНТЦ РФ «НИФХИ», МНТЦ:-М.: 2006.

8. *Барталев С.А., Князев Н.А., Палатов Ю.А. и др.*, Современные возможности создания региональной системы космического мониторинга экологической обстановки и контроля сельскохозяйственной деятельности //Вторая открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». // М.:ИКИ РАН. 16-18 ноября 2004 г.
9. *Князев Н.А., Палатов Ю.А., Кулешов Ю.П., Втюрин С.А. и др.* Научно-технические предпосылки создания спутниковой системы контроля экологической радиационной и химической обстановки.//Вторая открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». // М.:ИКИ РАН. 16-18 ноября 2004 г.
10. *А.С. Борейшо, А.В.Савин и др.* Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квантовая электроника, 2005 г., 35, № 12.